

**RANCANG BANGUN ALAT *FLUORESCENCE*
IMAGING BERBASIS IoT TERKOMBINASI *DEEP*
LEARNING UNTUK MENDETEKSI KLOOROFIL PADA
SAYURAN HIJAU**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat sarjana S-1

Program studi fisika



Diajukan oleh:

Deyan Triyanda

22106020034

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2026

LEMBAR PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1466/Un.02/DST/PP.00.9/07/2026

Tugas Akhir dengan judul : Rancang Bangun Alat Fluorescence Imaging Berbasis IoT Terkombinasi Deep Learning
Untuk Mendeteksi Klorofil Pada Sayuran Hijau

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : DEYAN TRIYANDA
Nomor Induk Mahasiswa : 22106020034
Telah diujikan pada : Kamis, 18 Juni 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a547d410d281



Penguji I

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a509a2d519d2



Penguji II

Andi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a546362987b1



Yogyakarta, 18 Juni 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a5493954ebc1

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Deyan Triyanda

NIM : 22106020034

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul “Rancang Bangun alat *Fluorescence imaging* berbasis IoT terkombinasi *Deep learning* untuk Mendeteksi Klorofil pada Sayuran Hijau” adalah hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diujikan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 7 Juni 2026

Penulis


Deyan Triyanda
NIM. 22106020034

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Deyan Triyanda
NIM : 22106020034
Judul Skripsi : Rancang Bangun Alat Fluorescence Imaging Berbasis IoT Terkombinasi Deep Learning Untuk deteksi Klorofil Pada Sayuran Hijau

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Pembimbing II

Ade Kurniawan, M.Si., Ph.D.
NIP.19920721 201903 1 013

Yogyakarta, 25 Mei 2026

Pembimbing I

Frida Agung Rakhmadi, S.Si.,
M.Sc.
NIP.19780510 200501 1 003

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

“Ratusan halaman yang di buat ini tidak akan pernah mampu membalas perjuangan ibu yang melahirkan dan ayah yang mengorbankan segalanya”

(penulis)

“Berjuang untuk meraih gelar sarjana layaknya Persib Bandung berjuang meraih bintang 5. Tekad kami sama: Menuntaskan perjuangan sampai akhir dengan bantuan doa”

(penulis)

“Satu-satunya yang membentengi kita mewujudkan masa depan adalah keraguan kita hari ini”

(Franklin.D.Roosevelt)

PERSEMBAHAN

Karya ini penulis persembahkan kepada Mamah dan Bapak tercinta, sosok yang tak pernah lelah mendoakan, mendukung, dan mengorbankan banyak hal demi kebahagiaan serta masa depan anaknya. Setiap halaman dalam skripsi ini adalah bagian kecil dari rasa terima kasih atas cinta dan perjuangan yang tak akan pernah dapat terbalaskan. Persembahan ini juga ditujukan kepada diri sendiri, yang telah memilih untuk tetap melangkah meskipun tidak selalu mudah.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Rancang Bangun Alat *Fluorescence Imaging* Berbasis IoT Terkombinasi *Deep learning* untuk Mendeteksi Klorofil pada Sayuran Hijau” dengan baik. Penulisan tugas akhir ini dilatarbelakangi oleh pentingnya pengembangan teknologi dalam bidang instrumentasi, khususnya dalam pemanfaatan *fluorescence imaging* yang dikombinasikan dengan *Internet of Things* (IoT) dan *deep learning* untuk mendukung analisis kandungan klorofil pada sayuran hijau. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem yang mampu mendeteksi klorofil secara lebih efektif dan efisien, dengan cakupan meliputi perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, serta pengujian kinerja sistem yang telah dibuat. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta bimbingan, sehingga pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, serta hidayah-Nya sehingga penulis diberikan kelancaran dan kemudahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Mamah dan Bapak, atas doa, dukungan, motivasi, serta pengorbanan dalam membiayai pendidikan penulis sejak awal hingga selesai.

3. A Hedy Helvian dan Teh Viska Restivani yang telah memberikan dukungan, semangat, serta bantuan baik secara moril maupun materiil selama proses perkuliahan.
4. Bapak Prof. H. Noorhaidi Hasan, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardani, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
6. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
7. Bapak Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik Program Studi Fisika angkatan 2022 sekaligus Dosen Pembimbing I yang senantiasa memberikan arahan, masukan, wawasan, serta motivasi yang sangat berarti dalam proses penyusunan skripsi ini.
8. Bapak Ade Kurniawan, M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan serta arahan, baik secara teknis maupun akademik, selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
9. Seluruh dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan wawasan selama masa perkuliahan.
10. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. dan Bapak Andi, M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, serta masukan yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

11. Teman-teman Instrumentasi Fisika angkatan 2022 yang telah menjadi keluarga selama masa perkuliahan, serta selalu memberikan dukungan, semangat, dan kebersamaan yang berkesan.
12. Teman-teman Umecour 2022, PinkyBoys, dan KKN yang senantiasa memberikan hiburan, canda tawa, serta kebersamaan di waktu senggang.
13. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan doa, bantuan, dukungan, dan semangat dalam penyusunan tugas akhir ini.
14. Diri penulis sendiri yang telah berusaha, berproses, dan bertahan hingga mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif guna penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Yogyakarta, 7 Juni 2026

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Penulis

RANCANG BANGUN ALAT *FLUORESCENCE IMAGING* BERBASIS IoT TERKOMBINASI *DEEP LEARNING* UNTUK MENDETEKSI KLOORIFIL PADA SAYURAN HIJAU

Devan Trivanda
22106020034

INTISARI

Telah berhasil dibuat alat *fluorescence imaging* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan *deep learning* untuk mendeteksi klorofil pada sayuran hijau. Penelitian ini merupakan pengembangan dari *fluorescence imaging system* generasi sebelumnya yang masih memiliki keterbatasan pada fleksibilitas sistem, kualitas citra, segmentasi area fluoresensi, dan pengembangan perangkat lunak. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan alat *fluorescence imaging* berbasis IoT yang menggunakan bahasa pemrograman Python serta menerapkan metode *deep learning* model *Real Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network* (Real-ESRGAN) dan *U²-Net*. Alat dirancang melalui penyusunan skema rangkaian menggunakan Proteus, desain *casing* menggunakan *SolidWorks*, dan diagram alir sistem menggunakan Draw.io, kemudian direalisasikan menggunakan LED UV 365nm sebagai sumber eksitasi fluoresensi dan ESP32-CAM sebagai perangkat akuisisi citra. Pengolahan citra menggunakan model Real-ESRGAN untuk reduksi *noise* dan peningkatan resolusi, sedangkan segmentasi area fluoresensi dilakukan secara otomatis menggunakan model *U²-Net*. Sampel yang digunakan meliputi bayam, selada, sawi hijau, dan pakcoy. Pengujian dilakukan oleh dua operator menggunakan alat *fluorescence imaging* yang telah dikembangkan untuk mengevaluasi proporsi area fluoresensi klorofil, presisi keterulangan, presisi antara, dan kinerja komunikasi data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proporsi area fluoresensi klorofil pada bayam menurun dari 65,97%–66,80% pada hari pertama menjadi 37,04%–38,74% pada hari ketiga, pada selada dari 73,84%–74,90% menjadi 61,72%–62,65%, pada sawi hijau dari 72,82%–73,68% menjadi 34,87%–35,78%, dan pada pakcoy dari 82,80%–84,83% menjadi 27,89%–28,78%. Nilai presisi keterulangan berada pada rentang 98,79% hingga 99,81%, sedangkan nilai presisi antara berada pada rentang 99,20% hingga 99,87%, sehingga memenuhi kriteria penerimaan yang mengacu pada SNI ISO/IEC 17025:2017. Selain itu, pengujian komunikasi data menunjukkan nilai *throughput* antara 1150 kbps hingga 1777 kbps yang termasuk kategori baik hingga sangat baik berdasarkan standar *Quality of Service* (QoS) TIPHON. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menghasilkan pengukuran yang konsisten, mendukung analisis citra fluoresensi secara otomatis, serta memiliki performa transmisi data yang stabil sehingga berpotensi menjadi alternatif metode deteksi klorofil yang cepat dan non-destruktif.

Kata kunci: *fluorescence imaging*, IoT, *deep learning*, klorofil, ESP32-CAM.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN IoT-BASED FLUORESCENCE IMAGING DEVICE INTEGRATED WITH DEEP LEARNING FOR CHLOROPHYLL DETECTION IN GREEN VEGETABLES

Devan Trivanda

22106020034

ABSTRACT

An Internet of Things (IoT)-based fluorescence imaging system integrated with deep learning has been successfully developed for chlorophyll detection in green vegetables. This study represents an advancement of the previous generation of fluorescence imaging systems, which still had limitations in system flexibility, image quality, fluorescence area segmentation, and software development. To address these limitations, an IoT-based fluorescence imaging system was developed using the Python programming language and implementing the Real Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network (Real-ESRGAN) and U²-Net deep learning models. The system was designed through circuit schematic development using Proteus, casing design using SolidWorks, and system flowchart development using Draw.io, and was realized using a 365 nm UV LED as the fluorescence excitation source and an ESP32-CAM as the image acquisition device. Image processing employed the Real-ESRGAN model for noise reduction and image resolution enhancement, while automatic fluorescence area segmentation was performed using the U²-Net model. The samples consisted of spinach, lettuce, mustard greens, and pakcoy. Testing was conducted by two operators using the developed fluorescence imaging system to evaluate chlorophyll fluorescence area proportion, repeatability precision, intermediate precision, and data communication performance. The results showed that the chlorophyll fluorescence area proportion in spinach decreased from 65.97%–66.80% on the first day to 37.04%–38.74% on the third day, in lettuce from 73.84%–74.90% to 61.72%–62.65%, in mustard greens from 72.82%–73.68% to 34.87%–35.78%, and in pakcoy from 82.80%–84.83% to 27.89%–28.78%. The repeatability precision values ranged from 98.79% to 99.81%, while the intermediate precision values ranged from 99.20% to 99.87%, thereby meeting the acceptance criteria specified in SNI ISO/IEC 17025:2017. Furthermore, data communication testing showed throughput values ranging from 1150 kbps to 1777 kbps, which fall within the good to very good categories according to the Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON) Quality of Service (QoS) standard. These results indicate that the developed system is capable of providing consistent measurements, supporting automatic fluorescence image analysis, and maintaining stable data transmission performance, thereby demonstrating its potential as a rapid and non-destructive alternative method for chlorophyll detection.

Keywords: fluorescence imaging, IoT, deep learning, chlorophyll, ESP32-CAM.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
INTISARI	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Studi Pustaka.....	9
2.2 Landasan Teori	15
2.2.1 Sayuran Hijau.....	15
2.2.2 Klorofil	17
2.2.3 Fluoresensi	18
2.2.4 <i>Fluorescence Imaging</i>	22
2.2.5 <i>Internet of Things</i>	24
2.2.6 ESP32-CAM.....	27
2.2.7 <i>Deep learning</i>	29
2.2.8 <i>Grayscale</i>	33
2.2.9 <i>Three-Level Thresholding</i>	35
2.2.10 Presisi	36

2.2.11 Kestabilan Komunikasi Data Berbasis IoT	38
BAB III METODE PENELITIAN	41
3.1 Waktu dan Tempat.....	41
3.1.1 Waktu dan Tempat Penelitian	41
3.2 Alat dan Bahan	41
3.2.1 Alat Penelitian	41
3.2.2 Bahan Penelitian.....	42
3.3 Prosedur Penelitian.....	43
3.3.1 Perancangan Alat.....	45
3.3.2 Pembuatan Alat	48
3.3.3 Pengujian Alat	50
3.4 Sistematika Pembahasan Hasil Penelitian.....	60
3.4.1 Sistematika Pembahasan Hasil Perancangan dan Pembuatan.....	61
3.4.2 Sistematika Pembahasan Hasil Pengujian	61
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	63
4.1 Hasil Penelitian	63
4.1.1 Hasil Perancangan	63
4.1.2 Hasil Pembuatan.....	65
4.1.3 Hasil Pengujian	67
4.2 Pembahasan.....	70
4.2.1 Pembahasan Hasil Perancangan dan Pembuatan	70
4.2.2 Pembahasan Hasil Pengujian	75
4.3 Integrasi-interkoneksi.....	81
BAB V PENUTUP	83
5.1 Kesimpulan	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	86
LAMPIRAN.....	91

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan pustaka	14
Tabel 2.2 Standar <i>throughput</i> TIPHON (ETSI TR 101 329).....	40
Tabel 3.1 Alat Penelitian	41
Tabel 3.2 Bahan Penelitian	42
Tabel 3.3 Data presisi keterulangan dan antara sampel bayam	52
Tabel 3.4 Data presisi keterulangan dan antara sampel selada.....	53
Tabel 3.5 Data presisi keterulangan dan antara sampel sawi hijau	53
Tabel 3.6 Data presisi keterulangan dan antara sampel pakcoy	54
Tabel 3.7 Data <i>throughput</i> sampel bayam	54
Tabel 3.8 Data <i>throughput</i> sampel selada.....	55
Tabel 3.9 Data <i>throughput</i> sampel sawi hijau	55
Tabel 3.10 Data <i>throughput</i> sampel pakcoy	56
Tabel 3.11 Hasil penghitungan nilai presisi keterulangan sampel bayam	58
Tabel 3.12 Hasil penghitungan nilai presisi keterulangan sampel selada.....	58
Tabel 3.13 Hasil penghitungan nilai presisi keterulangan sampel sawi hijau	58
Tabel 3.14 Hasil penghitungan nilai presisi keterulangan sampel pakcoy	58
Tabel 3.15 Hasil penghitungan nilai presisi antara sampel bayam.....	58
Tabel 3.16 Hasil penghitungan nilai presisi antara sampel selada	58
Tabel 3.17 Hasil penghitungan nilai presisi antara sampel sawi hijau	59
Tabel 3.18 Hasil penghitungan nilai presisi antara sampel pakcoy	59
Tabel 3.19 Hasil penghitungan nilai <i>throughput</i> sampel bayam	59
Tabel 3.20 Hasil penghitungan nilai <i>throughput</i> sampel selada	59
Tabel 3.21 Hasil penghitungan nilai <i>throughput</i> sampel sawi hijau.....	60
Tabel 3.22 Hasil penghitungan nilai <i>throughput</i> sampel pakcoy.....	60
Tabel 4.1 Hasil uji presisi keterulangan sampel bayam.....	68
Tabel 4.2 Hasil uji presisi keterulangan sampel selada	68
Tabel 4.3 Hasil uji presisi keterulangan sampel sawi hijau	68
Tabel 4.4 Hasil uji presisi keterulangan sampel pakcoy.....	68
Tabel 4.5 Hasil uji presisi antara sampel bayam	69
Tabel 4.6 Hasil uji presisi antara sampel selada	69
Tabel 4.7 Hasil uji presisi antara sampel sawi hijau.....	69
Tabel 4.8 Hasil uji presisi antara sampel pakcoy.....	69
Tabel 4.9 Hasil uji kestabilan komunikasi data berbasis IoT sampel bayam	69
Tabel 4.10 Hasil uji kestabilan komunikasi data berbasis IoT sampel selada	70
Tabel 4.11 Hasil uji kestabilan komunikasi data berbasis IoT sampel sawi hijau	70
Tabel 4.12 Hasil uji kestabilan komunikasi data berbasis IoT sampel pakcoy ...	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klorofil (YSI., 2025)	17
Gambar 2.2 Diagram Jablonski (Haugland dkk., 2002)	19
Gambar 2.3 Visualisasi emisi fluoresensi (Ahmad, 2022).	21
Gambar 2.4 Penangkapan fluoresensi menjadi gambar (Park dkk., 2024).....	23
Gambar 2.5 <i>Internet of Things System</i> (Aumraj, 2023).....	24
Gambar 2.6 ESP32-CAM (Dietz dkk., 2022).....	27
Gambar 2.7 <i>Generative network structure of Real-ESRGAN</i> (Zhu dkk., 2023)..	30
Gambar 2.8 Struktur jaringan U^2 -Net (Du dkk., 2020).....	32
Gambar 2.9 Throughput (Agrawal, 2024)	39
Gambar 3.1 Diagram blok alat <i>fluorescence imaging</i> keseluruhan	43
Gambar 4.1 Desain skema rangkaian perangkat keras	64
Gambar 4.2 Desain casing perangkat keras	64
Gambar 4.3 Diagram alir visualisasi alur sistem	65
Gambar 4.4 Rangkaian perangkat keras	66
Gambar 4.5 <i>Casing Alat fluorescence imaging</i> tampak (a) luar dan (b) dalam ..	66
Gambar 4.6 (a) UI Akuisisi citra, (b) UI pengolahan citra, (c) UI analisis citra. 67	



DAFTAR LAMPIRAN

Tabel Lampiran 1	Program akuisisi citra.....	93
Tabel Lampiran 2	Program <i>filtering</i> citra	93
Tabel Lampiran 3	Program <i>grayscale-histogram equalization</i>	93
Tabel Lampiran 4	Program <i>deep learning</i> model <i>U²-Net</i>	94
Tabel Lampiran 5	Program threshold untuk ekstraksi citra.....	94
Tabel Lampiran 6	Program <i>deep learning</i> model <i>Real-ESRGAN</i>	95
Tabel Lampiran 7	Program analisis citra (pembacaan nilai RGB dan grafik)....	95
Tabel Lampiran 8	Hasil <i>filtering</i> dan segmentasi	96
Tabel Lampiran 9	Hasil pengolahan citra dengan <i>grayscale</i>	96
Tabel Lampiran 10	Hasil pengolahan citra dengan <i>threshold</i> (ekstraksi).....	97
Tabel Lampiran 11	Hasil pengolahan citra menggunakan <i>Real-ESRGAN</i>	98
Tabel Lampiran 12	Grafik hasil <i>filtering</i> dan segmentasi.....	98
Tabel Lampiran 13	Grafik hasil pengolahan citra <i>grayscale</i>	99
Tabel Lampiran 14	Grafik hasil ekstraksi area fluoresensi.....	100
Tabel Lampiran 15	Data uji presisi sampel bayam.....	103
Tabel Lampiran 16	Data uji presisi sampel selada	104
Tabel Lampiran 17	Data uji presisi sampel sawi hijau	105
Tabel Lampiran 18	Data uji presisi sampel Pakcoy.....	106
Tabel Lampiran 19	Data uji kestabilan komunikasi data sampel bayam.....	107
Tabel Lampiran 20	Data uji kestabilan komunikasi data sampel selada	108
Tabel Lampiran 21	Data uji kestabilan komunikasi data sampel sawi hijau	109
Tabel Lampiran 22	Data uji kestabilan komunikasi data sampel pakcoy.....	110
Tabel Lampiran 23	Nilai proporsi area fluoresensi bayam dan selada	111
Tabel Lampiran 24	Nilai proporsi area fluoresensi sawi hijau dan pakcoy.....	112

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan teknik pencitraan fluoresensi dalam penelitian sistem biologis hidup telah berkembang menjadi salah satu metode eksperimen yang sangat penting dalam biologi modern. Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai teknologi pencitraan baru terus dikembangkan, sementara teknik yang telah ada mengalami penyempurnaan (Emptage, 2001). Seiring dengan perkembangan tersebut, teknik pencitraan fluoresensi semakin luas diterapkan dalam berbagai bidang penelitian dan aplikasi ilmiah. Salah satu bentuk pengembangan teknik pencitraan fluoresensi adalah *fluorescence imaging system* yang disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta merupakan salah satu lembaga yang mengembangkan *fluorescence imaging system* untuk mendukung identifikasi material berbasis karakteristik fluoresensi secara non-destruktif.

Generasi pertama, sistem dikembangkan untuk mendeteksi perbedaan fluoresensi antara lemak babi dan lemak sapi. Sistem ini menggunakan sumber cahaya ultraviolet (UV) dengan panjang gelombang 365 nm sebagai pengekstitasi dan kamera *webcam* M-Tech WB100 sebagai perangkat akuisisi citra. Proses pengolahan citra dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis LabVIEW yang terintegrasi dengan VISA untuk komunikasi data. Sistem ini mampu menampilkan perbedaan respons fluoresensi kedua sampel, sehingga menunjukkan potensi metode *fluorescence imaging* dalam proses identifikasi berbasis sifat optik. Namun demikian, citra yang dihasilkan masih cenderung mengalami *noise* akibat

keterbatasan resolusi kamera, khususnya pada kondisi akuisisi dengan pencahayaan rendah, serta belum dilengkapi dengan fitur analisis berbasis *Region of Interest* (ROI). Berdasarkan hasil tersebut, pengembangan selanjutnya direkomendasikan untuk mengintegrasikan analisis berbasis ROI guna meningkatkan fokus area pengamatan serta akurasi dalam proses pengolahan citra (Rakhmadi dan Rifai, 2020).

Pengembangan pada generasi kedua masih difokuskan pada objek penelitian yang sama, yaitu deteksi lemak babi dan lemak sapi, dengan konfigurasi perangkat lunak yang tetap menggunakan LabVIEW. Perubahan utama dilakukan pada sumber cahaya eksitasi dengan mengganti panjang gelombang UV menjadi 395 nm, sementara perangkat kamera yang digunakan masih menggunakan *webcam* yang sama. Modifikasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan panjang gelombang pengekstitasi terhadap respons fluoresensi sampel. Meskipun terjadi peningkatan pada karakteristik tampilan fluoresensi tertentu, keterbatasan pada kualitas akuisisi citra dan sistem analisis yang masih bersifat konvensional menunjukkan bahwa sistem masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan kestabilan dan fleksibilitas alat (Widayanti dan Rakhmadi, 2022).

Pengembangan lebih lanjut dilakukan pada generasi ketiga dengan peningkatan signifikan pada aspek perangkat akuisisi citra dan rentang pengekstitasi. Sistem ini menggunakan kamera CMOS Sony IMX291 yang memiliki sensitivitas lebih tinggi dibandingkan generasi sebelumnya, serta sumber cahaya UV dengan rentang panjang gelombang 280-285 nm yang dipadukan dengan dua LED putih sebagai pencahayaan tambahan. Berbeda dari generasi

sebelumnya yang berfokus pada deteksi lemak, generasi ketiga diarahkan untuk mendeteksi zat kromoforik berdasarkan karakteristik spektral dan distribusi warnanya. Perangkat lunak yang digunakan masih berbasis LabVIEW, namun dengan pengembangan fitur analisis yang lebih komprehensif. Sistem menghasilkan tiga keluaran utama, yaitu citra fluoresensi, spektrum warna, dan histogram RGB. Spektrum warna diperoleh dari transformasi ruang warna HSL (*Hue, Saturation, Lightness*) yang dibagi ke dalam beberapa *bin* berdasarkan kombinasi sektor hue dan tingkat saturasi, di mana setiap *bin* merepresentasikan wilayah warna tertentu dalam citra. Pendekatan ini memungkinkan analisis distribusi warna fluoresensi secara lebih terstruktur dan kuantitatif (Rakhmadi dkk., 2024).

Pengembangan *fluorescence imaging system* oleh UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta dari generasi pertama hingga generasi ketiga masih menyisakan beberapa keterbatasan. Menanggapi berbagai keterbatasan pada penelitian sebelumnya, penelitian ini berfokus pada pengembangan alat *fluorescence imaging* berbasis IoT yang terintegrasi dengan metode *deep learning*. Pada generasi pertama, hasil citra fluoresensi pada penelitiannya masih menunjukkan tingkat *noise* yang tinggi dan resolusi yang kurang optimal, sehingga kurang mendukung dalam analisis citra. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan metode *Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network* (ESRGAN) untuk meningkatkan kualitas citra melalui reduksi *noise* dan peningkatan resolusi. Selain itu, analisis citra berbasis ROI diimplementasikan menggunakan metode *deep*

learning model *U²-Net* untuk melakukan segmentasi dan ekstraksi area fluoresensi secara otomatis menggunakan *threshold*.

Pengembangan pada generasi kedua, sistem yang dikembangkan masih menghadapi kendala dalam hal kestabilan dan fleksibilitas operasional. Kondisi ini menyebabkan proses akuisisi data belum berjalan secara optimal, terutama dalam penggunaan di berbagai kondisi lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan lebih lanjut melalui integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk memungkinkan akuisisi dan transmisi data secara *real-time* melalui jaringan nirkabel. Integrasi ini diharapkan dapat meningkatkan fleksibilitas penggunaan alat, mengurangi ketergantungan pada koneksi kabel, serta mendukung pengambilan dan analisis data secara jarak jauh.

Pengembangan pada generasi ketiga, sistem telah menggunakan perangkat lunak berbasis LabVIEW dengan pengembangan fitur analisis yang lebih komprehensif. Sistem ini mampu menghasilkan tiga keluaran utama, yaitu citra fluoresensi, spektrum warna, dan histogram RGB. Meskipun demikian, penggunaan LabVIEW masih memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas pengembangan, khususnya untuk integrasi dengan metode berbasis *deep learning*. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan bahasa pemrograman Python yang lebih mendukung implementasi *deep learning* serta memberikan kemudahan dalam pengembangan dan pengelolaan aplikasi secara lebih fleksibel. Alat *fluorescence imaging* berbasis IoT yang dikembangkan selanjutnya diaplikasikan untuk mendeteksi fluoresensi klorofil pada sampel sayuran hijau.

Penelitian ini menggunakan sampel sayuran hijau, yaitu bayam, selada, sawi hijau, dan pakcoy. Keempat jenis sayuran tersebut termasuk komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan kualitasnya sangat dipengaruhi oleh kandungan klorofil karena berkaitan langsung dengan mutu visual dan tingkat kesegaran produk (Situmorang, 2025). Klorofil merupakan pigmen utama yang berperan dalam proses fotosintesis (Dharmadewi, 2020), sehingga informasi mengenai kandungan klorofil menjadi penting dalam evaluasi kualitas sayuran hijau. Pada penelitian yang dilakukan Dharmadewi (2020), penentuan kandungan klorofil dilakukan melalui proses ekstraksi sampel sehingga pengukurannya bersifat destruktif dan menyebabkan sampel tidak dapat digunakan kembali. Karakteristik fluoresensi yang dimiliki klorofil memungkinkan deteksi kandungan klorofil dilakukan secara non-destruktif. Klorofil merupakan fluorofor alami yang mampu memancarkan emisi fluoresensi ketika dieksitasi oleh cahaya pada panjang gelombang tertentu (Janeeshma dkk., 2022). Menurut Honor Test Technology (2018), analisis fluoresensi klorofil merupakan metode yang ideal untuk menentukan status nutrisi tanaman secara non-destruktif karena mampu mencerminkan karakteristik fotosintesis dan kondisi fisiologis tanaman. Oleh karena itu, *fluorescence imaging* dipilih sebagai metode yang sesuai untuk mendeteksi dan menganalisis fluoresensi klorofil secara non-destruktif.

Perancangan alat *fluorescence imaging* berbasis IoT perlu dilakukan sebagai panduan agar proses pengembangan sistem menjadi lebih terarah dan terstruktur sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Berdasarkan rancangan yang telah disusun, alat *fluorescence imaging* berbasis IoT kemudian dibuat melalui proses

integrasi perangkat keras dan perangkat lunak sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan. Selanjutnya, alat yang telah dibuat perlu diuji kinerjanya untuk memastikan bahwa setiap komponen berfungsi sesuai dengan rancangan dan mampu menghasilkan data pengukuran yang presisi. Pengujian dilakukan untuk mengetahui tingkat presisi hasil pengukuran dan kestabilan komunikasi data berbasis IoT. Melalui tahapan pengujian tersebut, tingkat kesesuaian alat terhadap spesifikasi yang diharapkan dapat dievaluasi dan digunakan sebagai dasar untuk melakukan kalibrasi serta penyempurnaan sistem agar alat memiliki kinerja yang stabil dan layak digunakan dalam penelitian maupun aplikasi lapangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti pada penelitian ini. Rumusan masalah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* terkombinasi *deep learning* untuk mendeteksi klorofil pada sayuran hijau?
2. Bagaimana pembuatan alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* terkombinasi *deep learning* untuk mendeteksi klorofil pada sayuran hijau?
3. Bagaimana kinerja alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* terkombinasi *deep learning* yang telah dibuat dalam mendeteksi klorofil pada sayuran hijau?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan, maka dapat disusun tujuan penelitian untuk mengatasi permasalahan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* terkombinasi *deep learning* untuk mendeteksi klorofil pada sayuran hijau.
2. Membuat alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* terkombinasi *deep learning* untuk mendeteksi klorofil pada sayuran hijau.
3. Menguji kinerja alat *fluorescence imaging* yang telah dibuat berbasis *IoT* terkombinasi *deep learning* dalam mendeteksi klorofil pada sayuran hijau.

1.4 Batasan Penelitian

Dalam merealisasikan tujuan penelitian, perlu diberi batasan agar penelitian dapat terfokus pada permasalahan yang telah dirumuskan. Batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kamera yang digunakan dalam pembuatan alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* adalah ESP32-CAM.
2. *Deep learning* yang digunakan adalah model *Real-ESRGAN* dan *U²-Net*.
3. Parameter pengujian kinerja alat *fluorescence imaging* meliputi tingkat presisi hasil pengukuran dan kestabilan komunikasi data berbasis *IoT*.
4. Sayuran hijau yang digunakan untuk menguji kinerja alat *fluorescence imaging* berbasis *IoT* adalah bayam, selada, sawi hijau, dan pakcoy.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memperoleh manfaat.

Manfaat yang diharapkan tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Menambah khazanah instrumen dan metode deteksi klorofil pada sayuran hijau.
2. Mendukung penjaminan mutu dari sayuran hijau.
3. Meningkatkan nilai ekonomi sayuran hijau.
4. Meningkatkan kesejahteraan petani sayuran hijau.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membuat, dan menguji alat *fluorescence imaging* berbasis IoT terkombinasi *deep learning* untuk mendeteksi klorofil pada sayuran hijau. Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Alat *fluorescence imaging* berbasis IoT terkombinasi *deep learning* telah berhasil dirancang, yang menghasilkan skema rangkaian, desain *casing*, dan diagram alir visualisasi alur sistem.
2. Alat *fluorescence imaging* berbasis IoT terkombinasi *deep learning* telah berhasil dibuat sehingga mampu melakukan akuisisi citra, pengolahan citra, dan analisis citra fluoresensi untuk mendukung deteksi klorofil pada sayuran hijau.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai proporsi area fluoresensi klorofil pada sampel bayam berada pada rentang 37,04%–66,80%, selada 61,72%–74,90%, sawi hijau 34,87%–73,68%, dan pakcoy 27,89%–84,83%. Secara umum, seluruh sampel menunjukkan kecenderungan penurunan proporsi area fluoresensi klorofil seiring bertambahnya waktu pengamatan, sehingga sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa intensitas fluoresensi klorofil akan berkurang selama proses penyimpanan atau senesens pada sayuran hijau. Nilai proporsi area fluoresensi yang diperoleh tersebut selanjutnya digunakan sebagai data pengukuran untuk menghitung presisi keterulangan dan presisi antara alat *fluorescence imaging* yang dikembangkan. Hasil pengujian menunjukkan

bahwa alat memiliki tingkat presisi keterulangan sebesar 99,13%–99,60% pada operator 1 dan 99,23%–99,58% pada operator 2, serta tingkat presisi antara sebesar 99,40%–99,66%. Seluruh hasil pengujian menghasilkan nilai %RSD di bawah batas maksimum 2,0% untuk metode penetapan kadar kuantitatif, sehingga memenuhi kriteria presisi yang ditetapkan dalam standar industri internasional. Selain itu, kinerja komunikasi data berbasis *Internet of Things* (IoT) berada pada kategori baik hingga sangat baik berdasarkan standar QoS TIPHON.

5.2 Saran

Perkembangan teknologi bersifat dinamis dan terus mengalami penyempurnaan seiring dengan kebutuhan pengguna yang semakin kompleks. Setiap sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk ditingkatkan, baik dari segi kinerja maupun fungsionalitas. Meskipun alat *fluorescence imaging* yang telah dirancang, direalisasikan, dan diuji dalam penelitian ini menunjukkan kinerja yang baik, masih terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut guna meningkatkan performa dan keandalan sistem di masa mendatang. Oleh karena itu, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk menggunakan kamera dengan resolusi yang lebih tinggi serta memiliki sensitivitas yang baik terhadap kondisi pencahayaan rendah, sehingga kualitas citra fluoresensi yang dihasilkan menjadi lebih optimal.
2. Penambahan filter *bandpass* pada jalur optik untuk meningkatkan selektivitas panjang gelombang cahaya yang diterima kamera, sehingga cahaya eksitasi dan

gangguan dari lingkungan dapat diminimalkan serta kualitas citra fluoresensi yang dihasilkan menjadi lebih baik.

3. Pengembangan perangkat lunak selanjutnya diharapkan dapat lebih ringan dalam penggunaan sumber daya, namun tetap mampu memberikan performa pengolahan citra yang lebih baik dan efisien.
4. Sistem disarankan dapat dikembangkan agar mendukung mode operasi berbasis IoT maupun non-IoT, sehingga alat tetap dapat digunakan secara fleksibel baik dalam kondisi terhubung jaringan maupun secara mandiri.
5. Penggunaan bahan *casing* yang lebih baik, seperti material ABS berbasis *3D printing*, disarankan untuk meningkatkan kekuatan, kerapihan, dan daya tahan alat.
6. Rangkaian elektronik disarankan direalisasikan dalam bentuk PCB agar konstruksi sistem menjadi lebih kokoh, rapi, dan stabil serta meminimalkan gangguan akibat sambungan yang kurang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, T. 2024. *Understanding Latency and Throughput*. Diakses 12 Januari 2026 dari <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-latency-throughput-tanay-agarwal-pcijc/>.
- Ahmad, A., Atero Calvo, S., Blasco León, B., Selmi, S., Candiani, A., dan Martos Núñez, V. 2022. Visualizing Chlorophyll a Fluorescence: A Practical Demonstration. REIDOCREA, **Vol.11 No.63**: 713–718.
- Aprilia, A., Rusmiyanto, E. P. W., dan Mukarlina. 2023. Pemberian pupuk organik cair limbah tahu dalam media hidroponik rakit apung terhadap pertumbuhan tanaman sawi hijau (*Brassica juncea* L.). *Ziraa'ah*, **Vol.48 No.2**: 225-232.
- Arief, M. A. A. 2023. *Chlorophyll Fluorescence Imaging for Early Detection of Drought and Heat Stress in Strawberry Plants*. *Plants*, **Vol.12 No.6**: 1387.
- Aslam, T., Maqsood, M., Jamshaid, I., Ashraf, K., Zaidi, F., Khalid, S., Shah, F. U. H., Noureen, S., dan Maria. 2020. *Health Benefits and Therapeutic Importance of Green Leafy Vegetables (GLVs)*. *European Academic Research*, **Vol. 8 No. 7**: 4213–4229.
- Aumraj. 2023. IoT System & Its Protocol Layers. Diakses 12 Januari 2026 dari <https://www.linkedin.com/pulse/IoT-system-its-protocol-layers-aumraj-design-system-2avkf/>.
- Chen, D.-Y., Peng, L., Li, W.-C., dan Wang, Y.-D. 2021. Building Extraction and Number Statistics in WUI Areas Based on UNet Structure and Ensemble Learning. *Remote Sensing*, **Vol.13**: 1172.
- Dharmadewi, I. M. 2020. *Analisis Kandungan Klorofil Pada Beberapa Jenis Sayuran Hijau Alternatif Bahan Dasar Food Supplement*. *Jurnal Emasains*, **Vol.9 No.2**: 171–177.
- Dietz, H.G., Abney, D., Eberhart, P.S., Santini, N., Davis, W., Wilson, E., dan McKenzie, M. 2022. *ESP32-CAM as a Programmable Camera Research Platform*. *Imaging Sensors and Systems* : 1-6.
- Du, G., Cao, X., Liang, J., Chen, X., dan Zhan, Y. 2020. *Medical Image Segmentation based on U-Net: A Review*. *Journal of Imaging Science and Technology*, **Vol.64 No.2**: 020508-1 – 020508-12.
- Emptage, N. J. 2001. Fluorescent Imaging in Living Systems. *Current Opinion in Pharmacology*, **Vol.1 No.5**: 521-525.
- European Medicines Agency. 2006. *ICH Topic Q2 (R1): Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology*. European Medicines Agency, London.
- Fan, B., Zhang, C., Chi, J., Liang, Y., Bao, X., Cong, Y., Yu, B., Li, X., dan Li, G.-Y. 2022. The Molecular Mechanism of Retina Light Injury Focusing on Damage from Short Wavelength Light. *Oxidative Medicine and Cellular*

Longevity, **Vol.2022** : 8482149.

- Fatma Yunarti Situmorang. 2025. "Implementation of Multiple Person Face Recognition for Attendance Application." 16(2): 129–36.
- Ferrer, B., Tomás, M. B., Pérez, J., Espinosa, J., dan Mas, D. 2025. Quantifying Self-Heating Effects in CMOS Cameras Using Subpixel Tracking and Zernike Analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, **Vol.195**: 109329.
- Global Instrument Service. 2025. Akurasi dan Presisi di Kalibrasi: Fondasi Penting Pengukuran. Diakses 11 Januari 2026 dari <https://ptgis.id/post/akurasi-dan-presisi-di-kalibrasi-fondasi-penting-pengukuran>.
- Hadi, H. S., Dani, A., Peramatasari, S. J., Sofyan, dan Vandika, A. Y. 2025. *Internet of Thing (IoT): Prinsip dan Implementasinya*. Yayasan Putra Adi Dharma. Bekasi.
- Haugland, R. P., Gregory, J., Spence, M. T. Z., Johnson, I., dan Miller, E. 2002. *Introduction to Fluorescence Techniques*. Molecular Probes, Inc., Eugene, Oregon, USA.
- Hermawan, A., dan Handayani, P. 2022. *Digital Transformasi Bisnis*. Universitas Wisnuwardhana Malang Press. Malang.
- Honor Test Technology. 2018. Pentingnya Klorofil Meter untuk Mengukur Kandungan Nitrogen dalam Tanaman. Diakses 1 Juli 2026. <https://id.chinatestingequipment.com/info/significance-of-chlorophyll-meter-for-measurin-30119629.html>.
- Indian Pharmacopoeia Commission. 2021. Guidance Document: Validation of Analytical Methods. Indian Pharmacopoeia Commission, Ghaziabad, India.
- Janeeshma, E., Johnson, R., Amritha, M. S., Noble, L., Aswathi, K. P. R., Telesiński, A., Kalaji, H. M., Auriga, A., dan Puthur, J. T. 2022. *Modulations in Chlorophyll a Fluorescence Based on Intensity and Spectral Variations of Light*. *International Journal of Molecular Sciences*, **Vol.23 No.10** : 5599.
- Jan, M. F., Li, M., Liaqat, W., Altaf, M. T., Liu, C., Ahmad, H., Khan, E. H., Ali, Z., Barutçular, C., dan Mohamed, H. I. 2025. Chlorophyll fluorescence: a smart tool for maize improvement. *Cereal Research Communications*, **Vol.53**: 617–648.
- Jeyalaksshmi, S., dan Prasanna, S. 2018. Measuring Distinct Regions of Grayscale Image Using Pixel Values. *International Journal of Engineering & Technology*, **Vol.7 No.1.1** : 121–124.
- Lu, F., Bu, Z., dan Lu, S. 2019. Estimating Chlorophyll Content of Leafy Green Vegetables from Adaxial and Abaxial Reflectance. *Sensors*, **Vol.19**: 4059.
- Marshall, J., dan Johnsen, S. 2017. Fluorescence as a Means of Colour Signal Enhancement. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **Vol.372**:

20160335.

- Milenkovic, M. 2020. *Internet of Things: Concepts and System Design*. Springer Nature Switzerland AG. Cham, Switzerland.
- Mulyawanti, I. 2024. Strategi Pengurangan Kehilangan Pascapanen Produk Hortikultura. Analisis Kebijakan Pertanian, **Vol.22 No.2**: 183–194.
- Nandal, P., Pahal, S., Khanna, A., dan Pinheiro, P. 2024. Super-Resolution of Medical Images Using Real ESRGAN. *IEEE Access*, Vol.12 : 176155-176170.
- Nowroz, S. T., Saleh, N. M., Shakur, S., Banerjee, S., dan Amsaad, F. 2025. A Benchmark Reference for ESP32-CAM Module. arXiv Preprint arXiv:2505.24081 [cs.RO].
- Octaviani, S. N., Raihan, dan Andrianto, M. I. 2024. Komunikasi Data Menggunakan Topology Tree Dalam Pembelajaran Sistem Jaringan dan Telekomunikasi. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Ekonomi Informatika*, **Vol. 3 No. 2 Juni 2024**: 209–214.
- Oktaviana, L., Nugroho, W. A., dan Al Riza, D. F. 2025. Evaluation of Peroxide Value and Free Fatty Acid Content in Coconut Oil and Palm Oil under Different Heating Temperature Treatments using Reflectance–Fluorescence-Based Computer Vision. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, **Vol.13 No.2**: 101–111.
- OpenCV Team. 2023. Color Conversions. Diakses 24 Juni 2026.
https://docs.opencv.org/3.4.20/de/d25/imgproc_color_conversions.html.
- Park, B., Wi, S., Chung, H., dan Lee, H.. 2024. *Chlorophyll Fluorescence Imaging for Environmental Stress Diagnosis in Crops*. *Sensors*, **Vol.24 No.5** : 1442.
- Petrovic, S., Zvezdanovic, J., dan Markovic, D. 2017. Chlorophyll Degradation in Aqueous Mediums Induced by Light and UV-B Irradiation: An UHPLC-ESI-MS Study. *Radiation Physics and Chemistry*, **Vol.141**: 8–16.
- Pitriyatiar, Saragih, Y., dan Latifa, U. 2021. Analisis Quality of Service (QoS) Jaringan Wi-Fi Untuk Sistem Pendeteksi Kebocoran LPG Menggunakan WireShark. *InComTech: Jurnal Telekomunikasi dan Komputer*, **Vol.11 No.2**: 154–165.
- Puspita, A. D., Santoso, A., dan Yulianto, B. 2013. Studi Akumulasi Logam Timbal (Pb) dan Efeknya Terhadap Kandungan Klorofil Daun Mangrove *Rhizophora mucronata*. *Journal of Marine Research*, **Vol.3 No.1**: 44–53.
- Rakhmadi, F. A., Rifai, R., dan Khamidinal. 2020. Design of First Generation of Sunan Kalijaga's High Power UV-LED Fluorescence Spectroscopy System. *Proceeding International Conference on Science and Engineering*, **Vol.3**: 17–19.
- Rakhmadi, F. A., Widayanti, dan Rifai, R. 2024. Design and Fabrication of UV Fluorescence Spectro-Imaging System to Detect Chromophoric Substances.

- Instrumentasi, **Vol.48 No.2**: 101-111.
- Riski, A. K., dan Lindawati, N. Y. 2025. Analisis Kandungan Klorofil Daun Telang (*Clitoria ternatea* L.) dengan Metode Spektrofotometri UV-Visibel. Jurnal Kesehatan Qamarul Huda, **Vol.13 No.1**: 35–40.
- Romadhoni, R. D., dan Wahyudi, D. 2025. Mengoptimalkan Jaringan Sensor Nirkabel dalam Aplikasi Monitor Lingkungan dengan Teknologi IoT di Indonesia. *Karapan Network Journal*, **Vol. I No. I**: 255–264.
- Sari, R., dan Sutopo, F. P. 2024. Verifikasi Kualitas Analisis Mangan Menggunakan Teknik ICP-OES dalam Sampel Air Minum. Jurnal Kimia Saintek dan Pendidikan, **Vol.8 No.1**: 21-27.
- Sasadara, M. M. V., Nayaka, N. M. D. M. W., Yuda, P. E. S. K., Cahyaningsih, E., dan Dewi, N. L. K. A. A. 2023. Pengaruh Pemilihan Pelarut dalam Ekstraksi Klorofil pada Rumput Laut *Gracilaria* sp. *Medicamento*, **Vol.9 No.1**: 22–28.
- Schweiger, J., dan Lang, M. 1996. *Differences in Fluorescence Excitation Spectra of Leaves between Stressed and Non-Stressed Plants*. *Journal of Plant Physiology*, **Vol.148 No.5**: 536–547.
- Sisriana, S., dan Sholihah, S. M. 2021. Pengaruh Berbagai Media Tanam Terhadap Pertumbuhan dan Kadar Pigmen Microgreens Selada. Jurnal Ilmiah Respati, **Vol.12 No.2**: 163–176.
- Situmorang, F. Y. 2025. Penerapan Good Agricultural Practices (GAP) dalam Budidaya Sayuran. Circle Archive, **Vol.1 No.7** : 1–9. Diakses 1 Juli 2026.
- Tarumingkeng, R. C. 2024. *Deep learning*. November 2024. IPB-University (Emeritus), Technological University of The Philippines, Bogor, Indonesia.
- Tao, W. B., Tian, J. W., dan Liu, J. 2003. Image Segmentation by Three-Level Thresholding Based on Maximum Fuzzy Entropy and Genetic Algorithm. *Pattern Recognition Letters*, **Vol.24** : 3069–3078.
- Tiwari, G., dan Tiwari, R. 2010. Bioanalytical Method Validation: An Updated Review. *Pharmaceutical Methods*, **Vol.1 No.1**: 25–38.
- Tominaga, S., Nishi, S., Ohtera, R., dan Sakai, H. 2025. A Method for Estimating Fluorescence Emission Spectra from the Image Data of Plant Grain and Leaves Without a Spectrometer. *Journal of Imaging*, **Vol.11 No.2** : 30.
- Trista, R. T. 2022. Peran Internet of Things (IoT) Dalam Industri 4.0. Jurnal Sains dan Teknologi Widyaloka, **Vol.1 No.2**: 235–241.
- Wenno, S. J., dan Sinay, H. 2019. Kadar Klorofil Daun Pakcoy (*Brassica chinensis* L.) Setelah Perlakuan Pupuk Kandang dan Ampas Tahu sebagai Bahan Ajar Mata Kuliah Fisiologi Tumbuhan. *Biopendix*, **Vol.5 No.2**: 130–139.
- Widayanti, dan Rakhmadi, F. A. 2022. Rancang Bangun Alat Deteksi Lemak Babi dan Lemak Sapi Menggunakan Sistem Spektroskopi Fluoresensi Berbasis

High Power UV-LED Generasi Dua. Prosiding Seminar Nasional Lontar Physics Forum VI 2022: 13–20.

Yama, D. I., dan Kartiko, H. 2020. Pertumbuhan dan Kandungan Klorofil Pakcoy (*Brassica rappa* L.) pada Beberapa Konsentrasi AB Mix dengan Sistem Wick. Jurnal Teknologi, **Vol.12 No.1**: 21–30.

YSI. 2025. *Parameters series chlorophyll measurement*. Diakses 12 Januari 2026 dari <https://www.ysi.com/parameters/chlorophyll>.

Zhong, S., Bird, A., dan Kopec, R. E. 2021. The Metabolism and Potential Bioactivity of Chlorophyll and Metallo-Chlorophyll Derivatives in the Gastrointestinal Tract. Molecular Nutrition & Food Research, **Vol.65**: 2000761.

Zhu, Z. 2023. *IRE: Improved Image Super-Resolution Based on Real-ESRGAN*. IEEE Access 11: 45334–45348.